

極低閾値電離信号を用いた 質量の小さい宇宙暗黒物質探索 検出器開発研究

佐藤 和史(東大ICRR) for XMASS collaboration

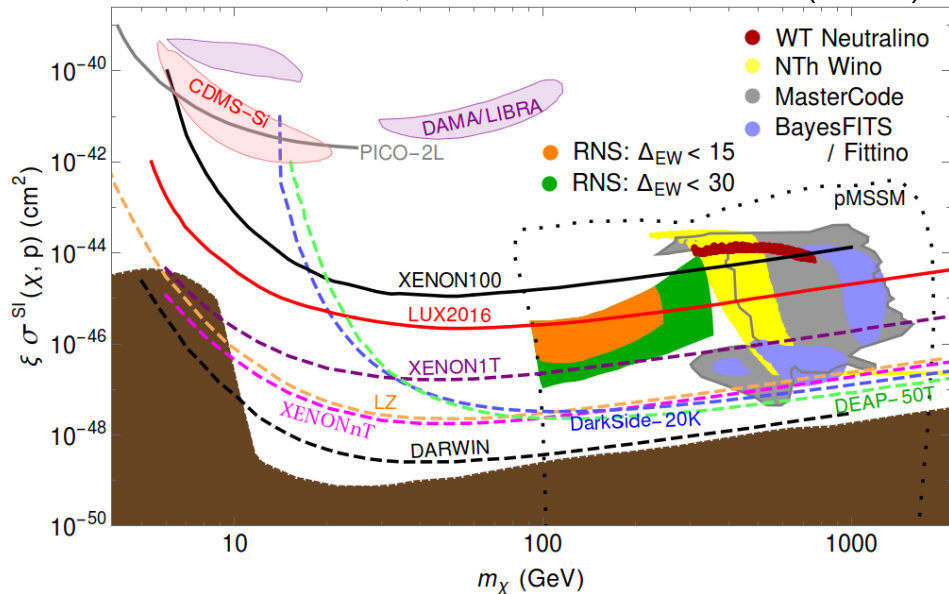
@ 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」領域研究会

22 May, 2017 in 岡山大学

“軽い”暗黒物質探索の必要性

直接探索実験の感度

H. Baer et al., arXiv:1609.06735v3 (2016)



暗黒物質の有力候補は**WIMPs**

- $M = \text{数十 GeV} \sim \text{TeV}$
- 直接探索実験(XENON, LUX, XMASS...)でも加速器実験(LHC)でも**未だ有意な信号はない**
→低質量に目を向けると。。。

観測

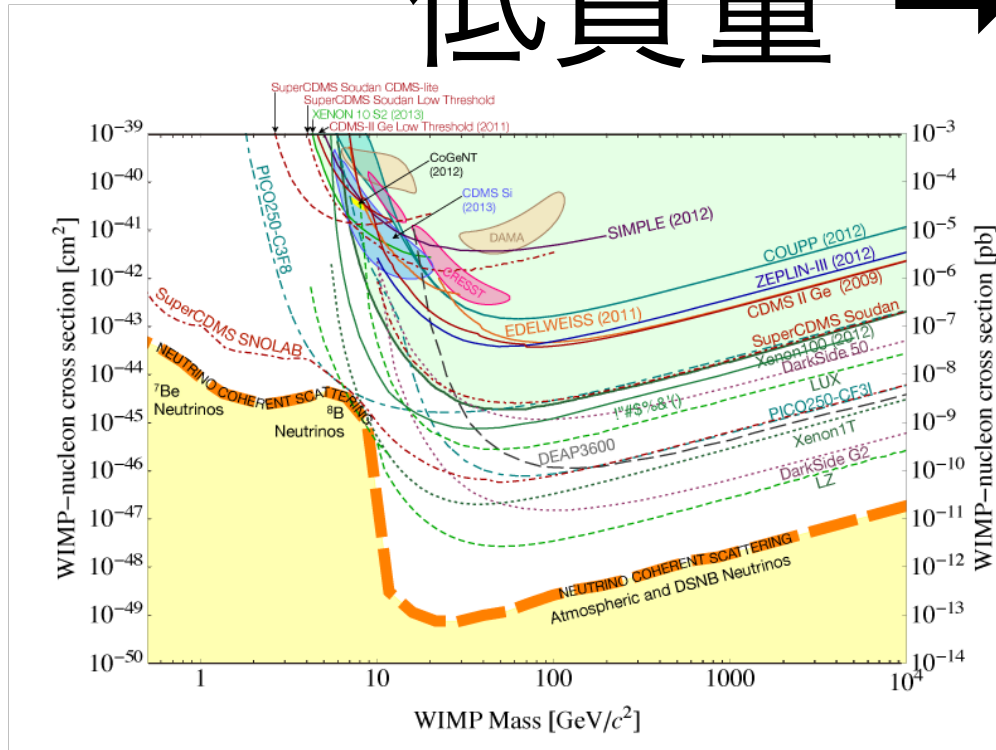
- $\sim 10 \text{ GeV}$: DAMA/LIBRA, CDMS-Siの測定結果

理論

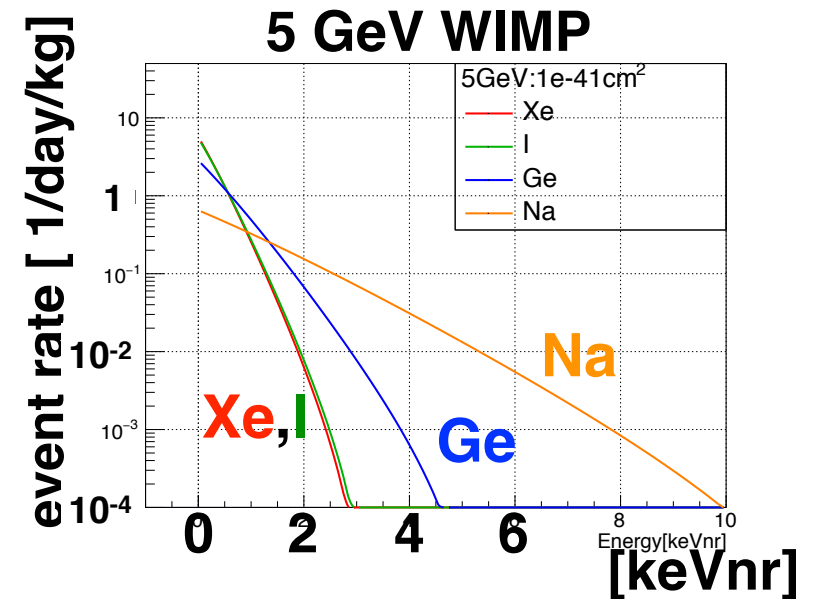
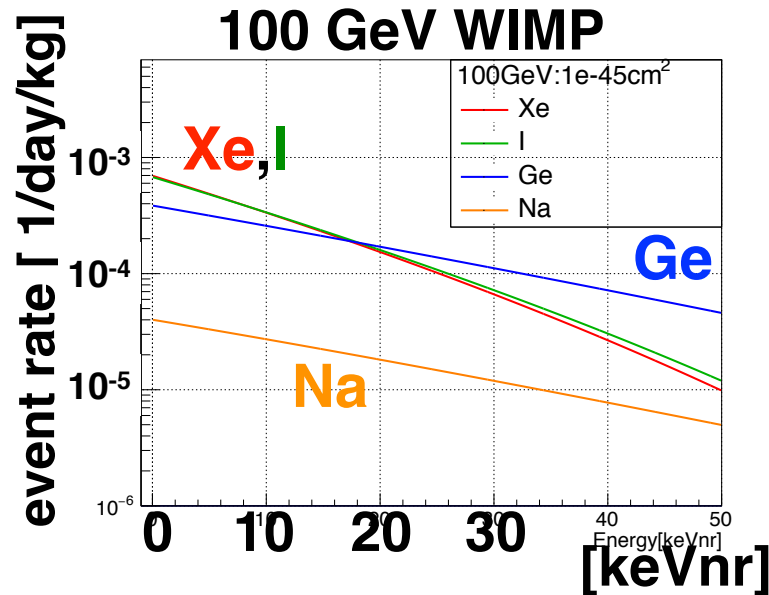
- WIMPの存在できるmass range: $1 \text{ MeV} \sim 100 \text{ TeV}$
- $< 10 \text{ GeV}$: Asymmetric DM
- $\text{MeV} \sim \text{GeV}$: electron scattering DM

👉 **1 MeV ~ 10 GeV**の**軽い暗黒物質**の探索も視野に入れる

低質量 → 低閾値



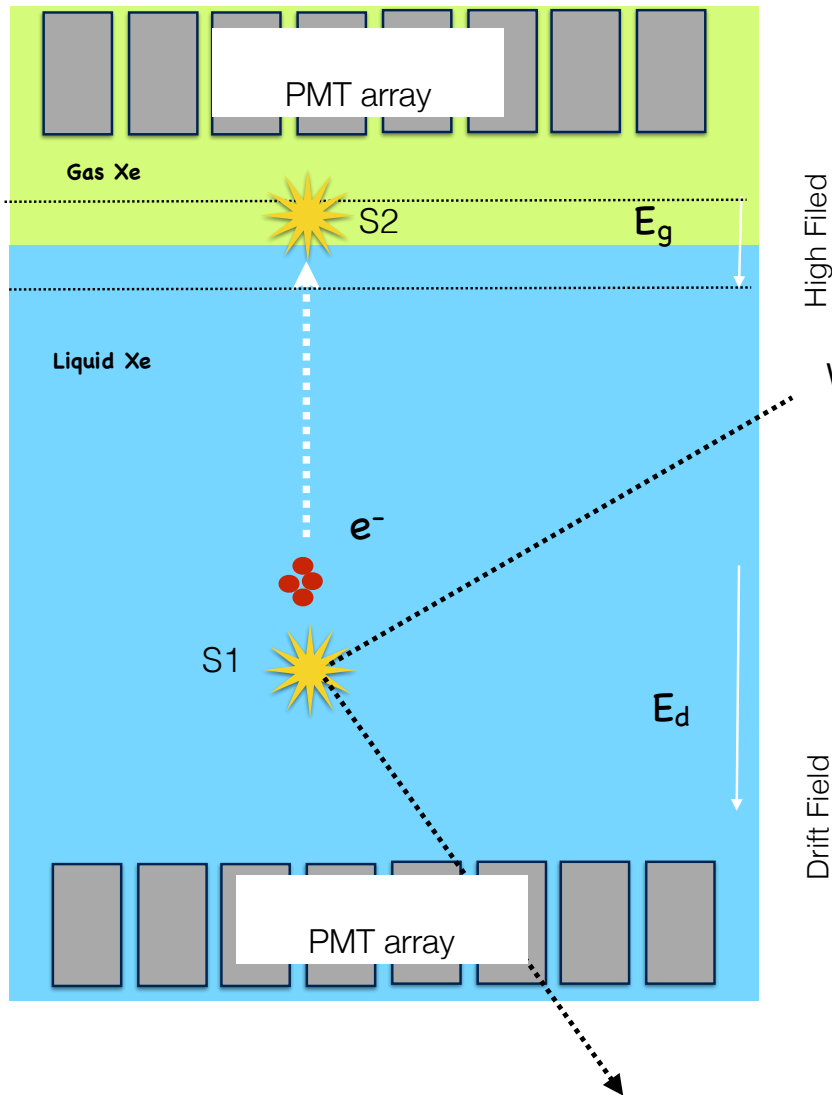
- 直接探索実験の感度は $M_{DM} < 10\text{GeV}$ で急激に悪化
- $M_{DM} < M_{\text{target}}$ では運動量移行が小さいため



低質量の探索には、**“低いエネルギー閾値”**が重要！

2相式XeTPCによる低閾値の取り組み

2相型TPC



XENONグループによる先行研究

- 通常はS1、S2双方の読み出し
- S2/S1による粒子識別能力

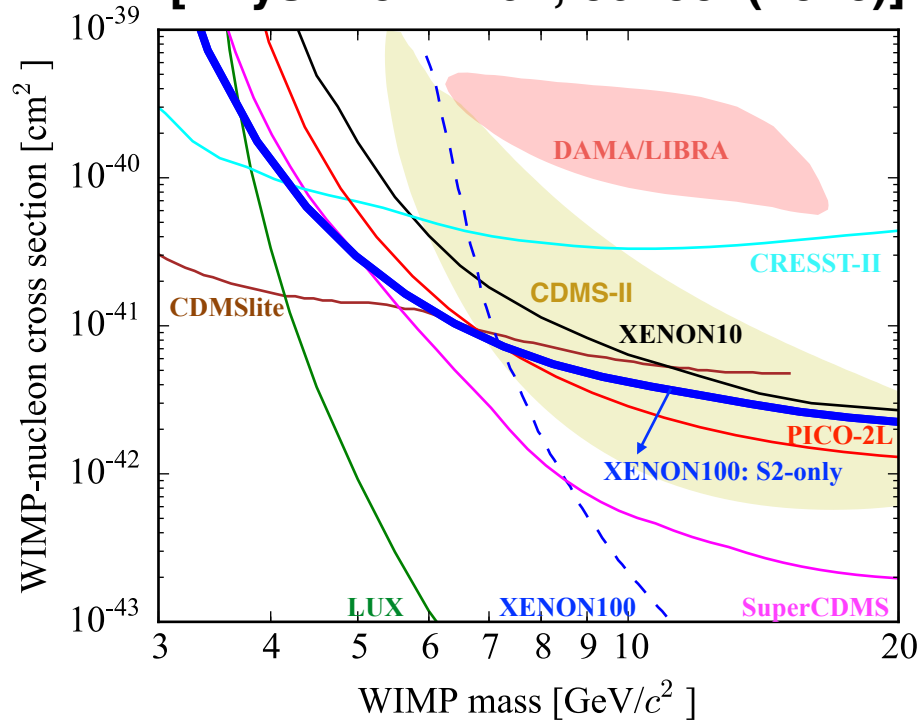
⇔ **S2 only**の読み出し

- 1ドリフト電子 ~ **200** S2光子
- **4 e^- threshold**
 - = 80 P.E. = 0.7 keVnr

cont.

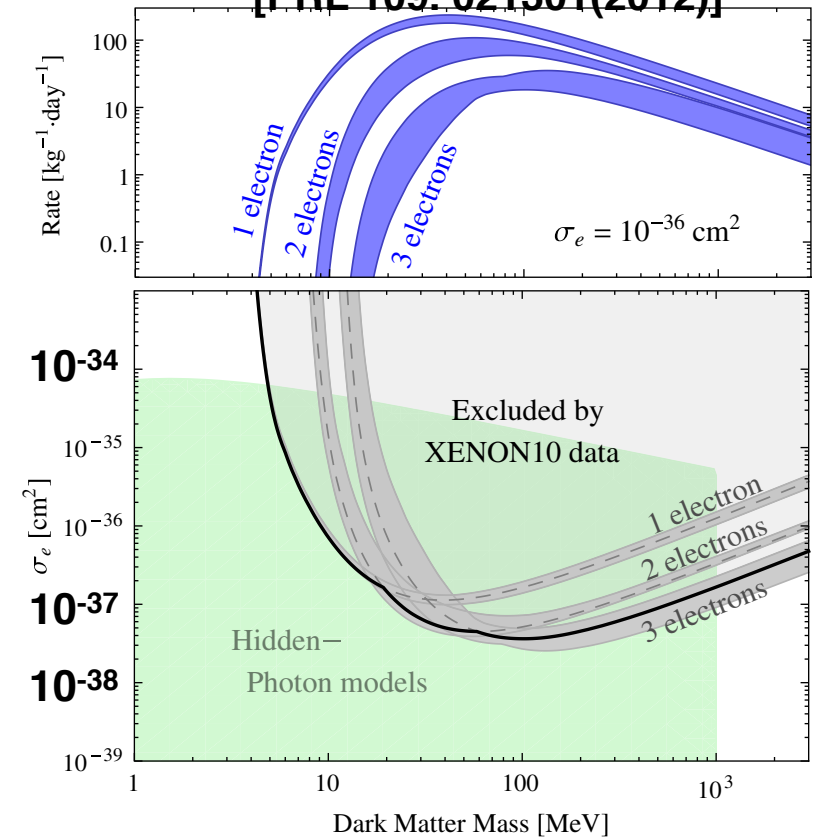
4e⁻ threshold search (XENON100)

[Phys. Rev. D 94, 092001(2016)]



< 4e⁻ threshold (XENON10)

[PRL 109, 021301(2012)]



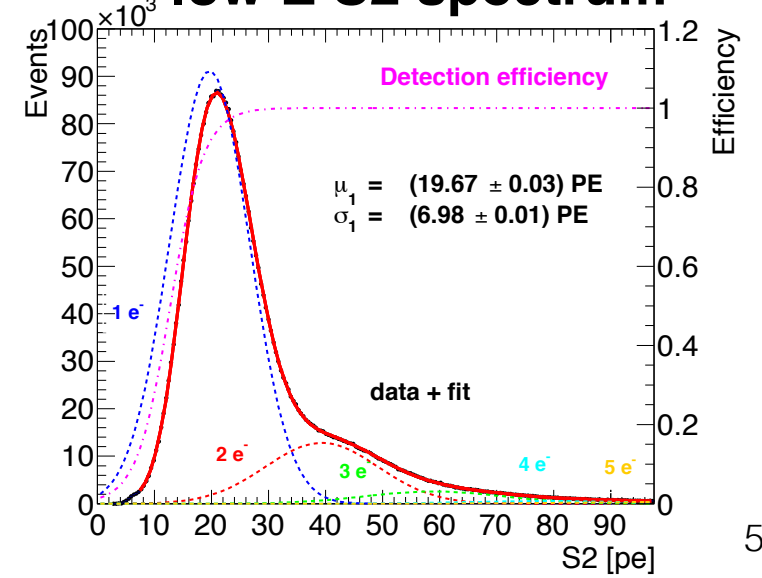
- BGが感度を決めている

- $\sigma = 10^{(-40 \sim -41)} \text{ cm}^2$

@ $M_{\text{DM}}=5\text{GeV}$

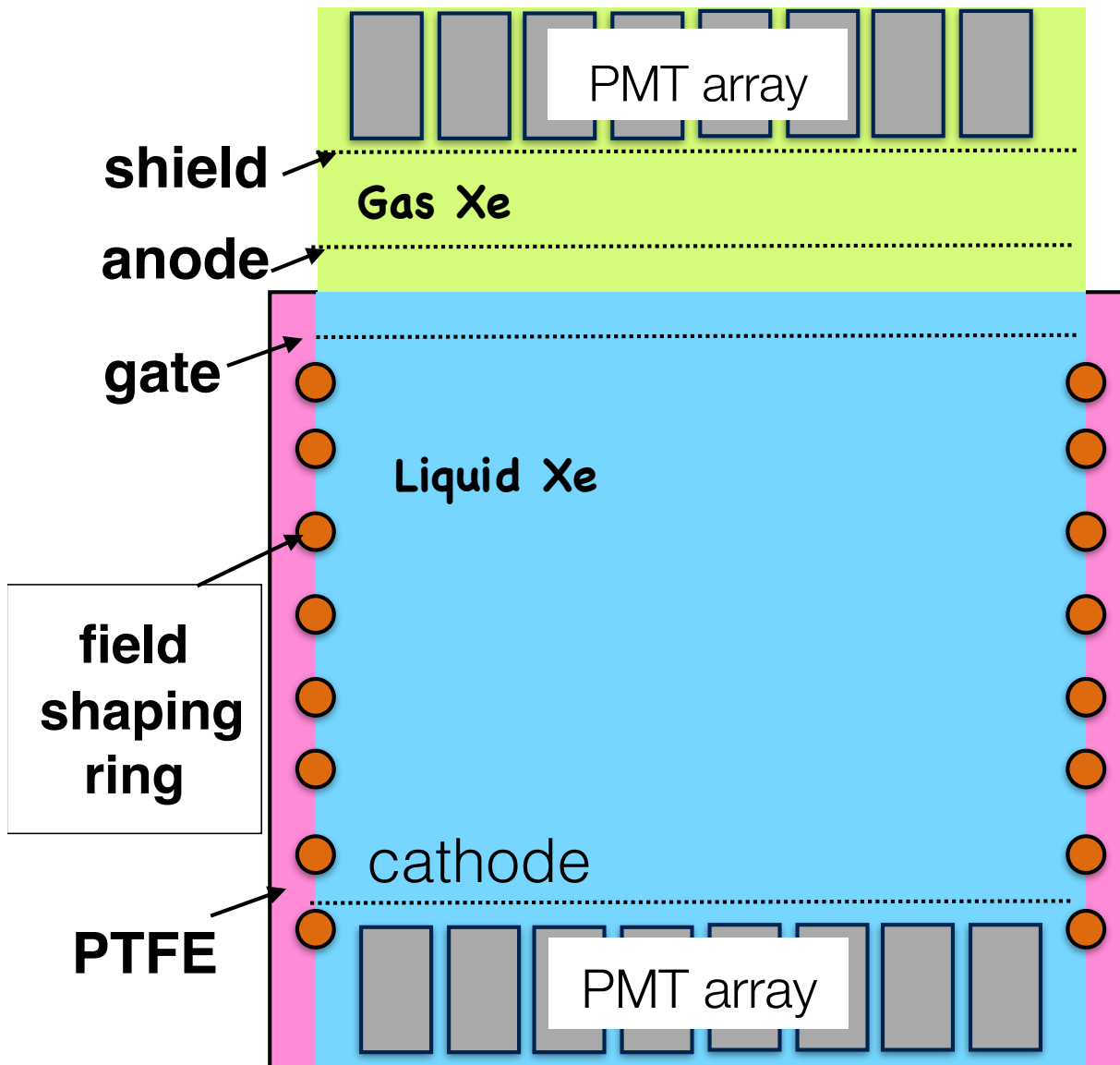
→ S2 only解析にはBGの低減が重要

low E S2 spectrum



XENONにおける背景事象

- いくつかのBG源が議論されている



ガス層での事象

- anode-shield wire間でガス増幅が起こりS2が発生

↓ E_{thre} を下げられない原因

Xe VUVによる光電効果

- Xeの発光(S1,S2) ~ 7eV
> 検出器部材の仕事関数

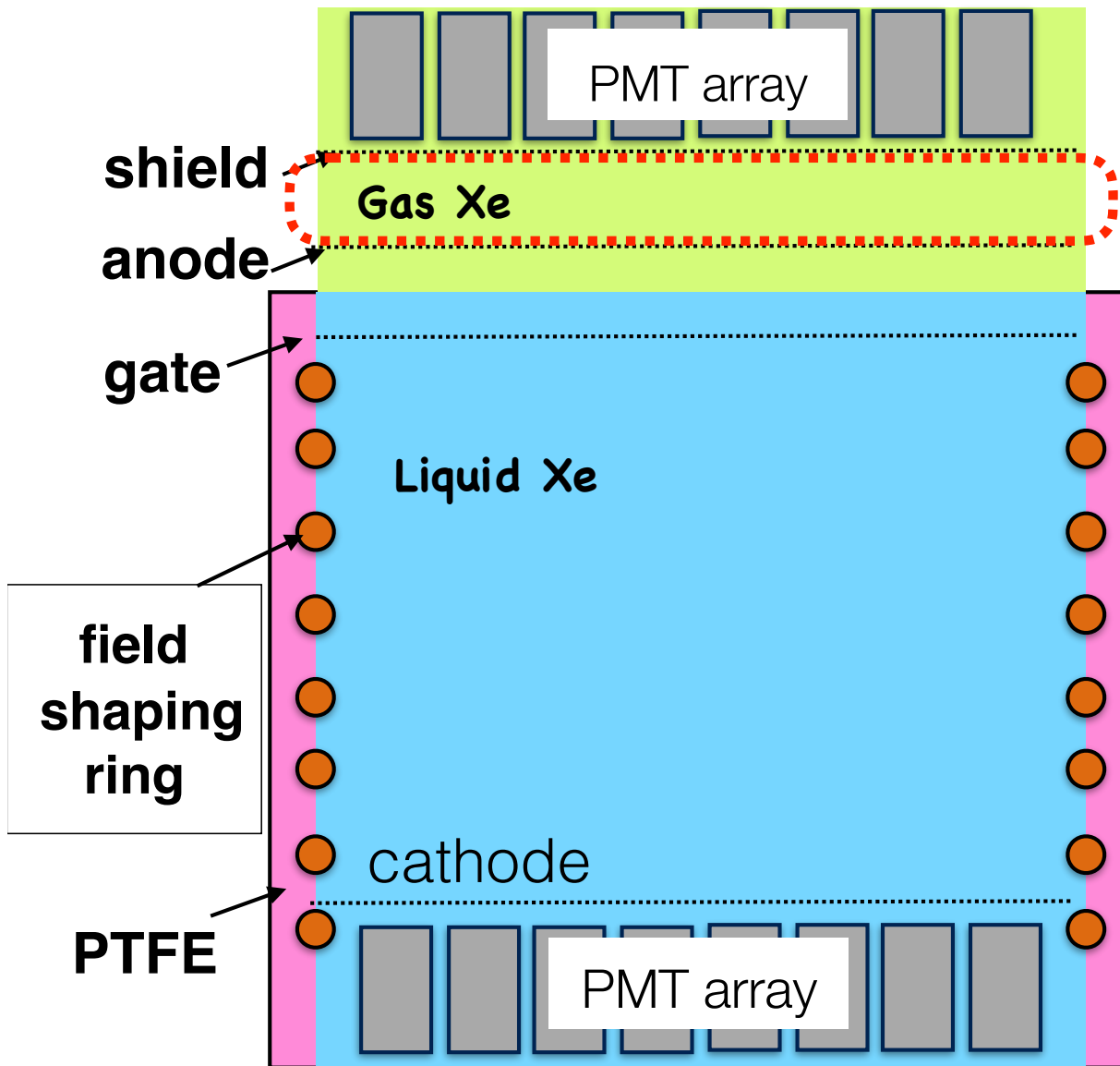
- Xe中の不純物(O_2, \dots)

放射線BGより2桁高い!

XENON10/100タイプ

XENONにおける背景事象

- いくつかのBG源が議論されている



ガス層での事象

- anode-shield wire間でガス増幅が起こりS2が発生

↓ E_{thre} を下げられない原因

Xe VUVによる光電効果

- Xeの発光(S1,S2) ~ 7eV
> 検出器部材の仕事関数

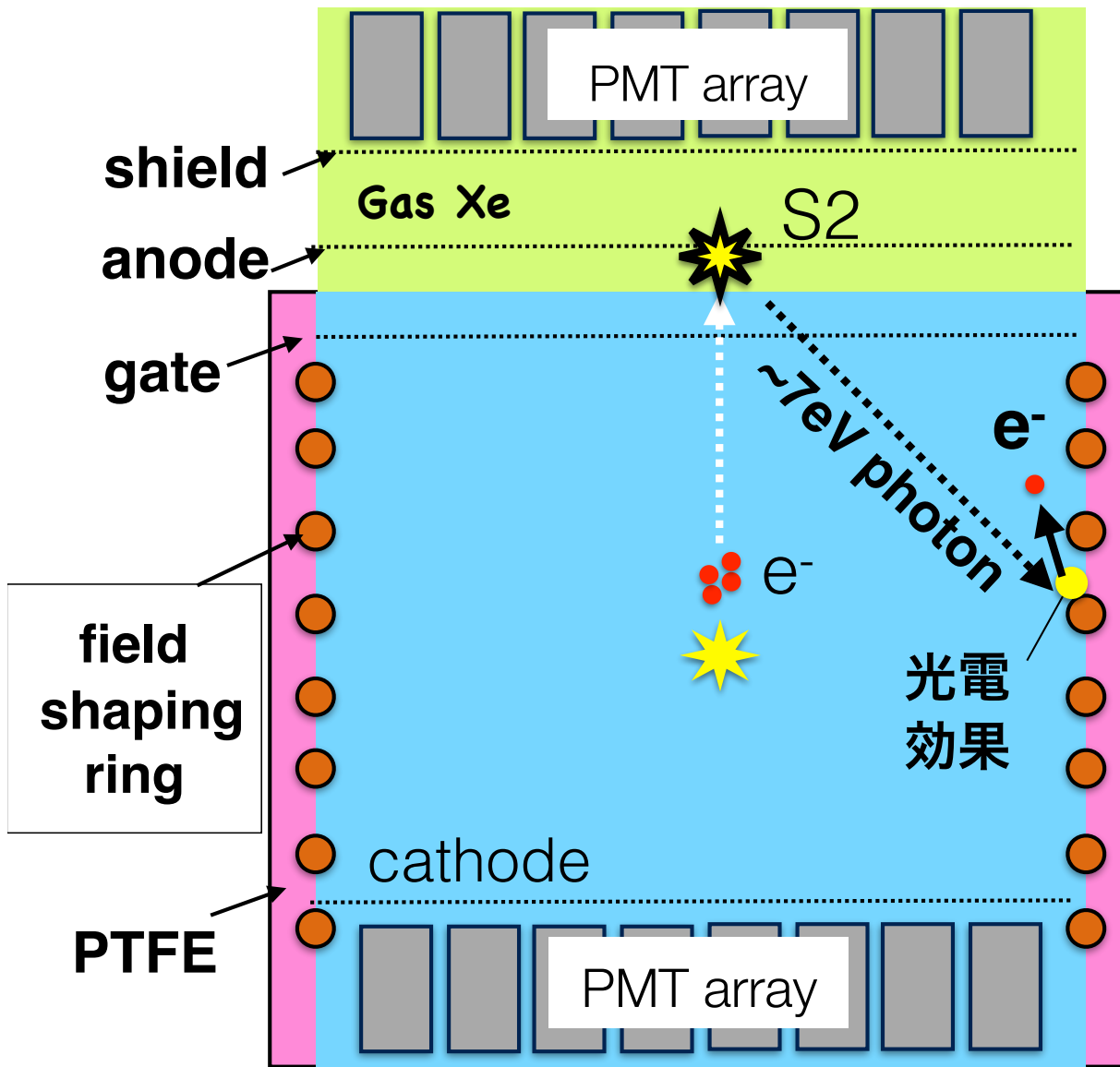
- Xe中の不純物(O_2, \dots)

放射線BGより2桁高い!

XENON10/100タイプ

XENONにおける背景事象

- いくつかのBG源が議論されている



XENON10/100タイプ

ガス層での事象

- anode-shield wire間でガス増幅が起こりS2が発生

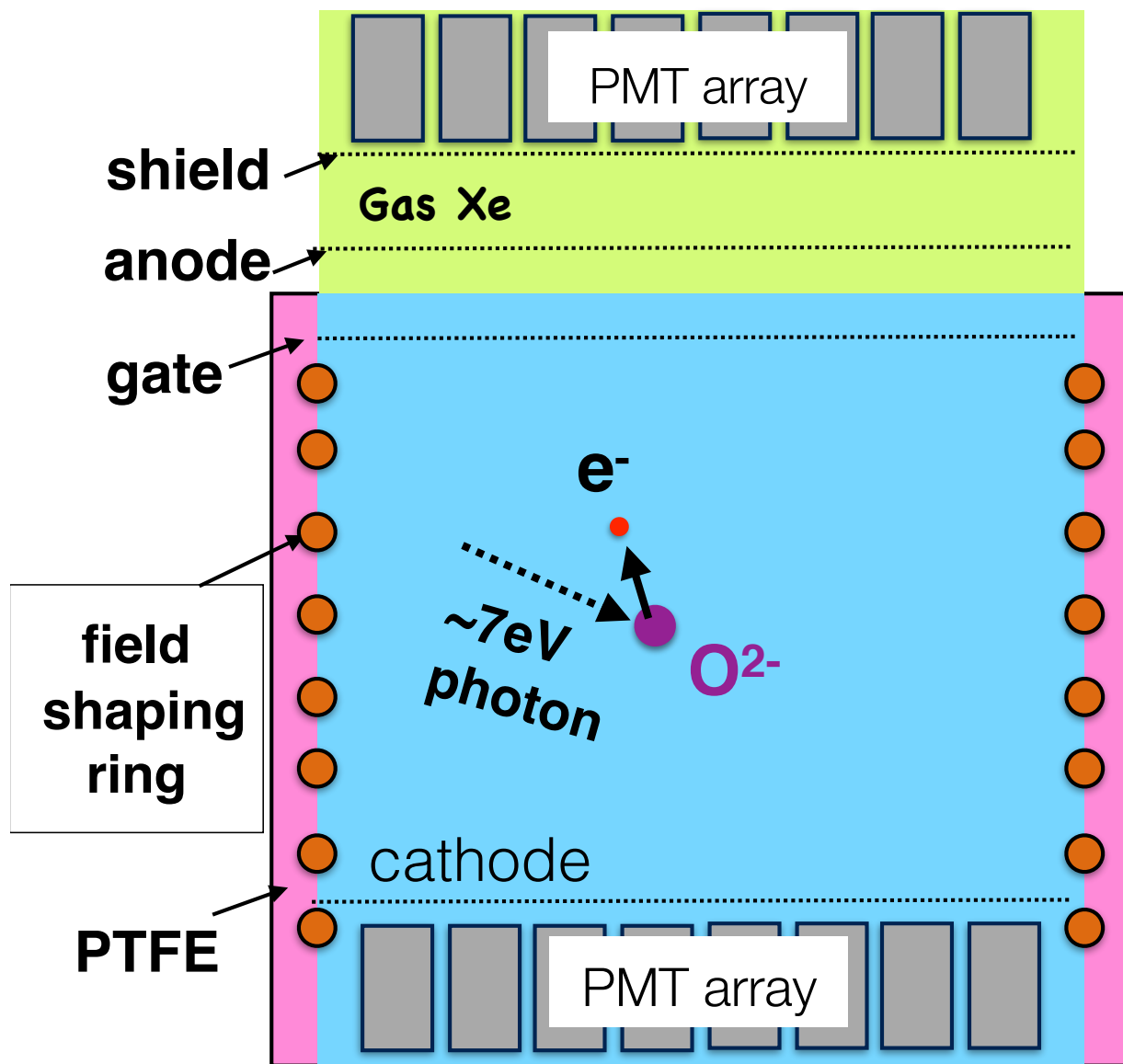
Xe VUVによる光電効果

- Xeの発光(S1,S2) ~ 7eV
> 検出器部材の仕事関数

材料	仕事関数
アルミ	4.53 [eV]
SUS	4.66 [eV]
銅	5.11 [eV]
PTFE	5.8 [eV]

XENONにおける背景事象

- いくつかのBG源が議論されている



ガス層での事象

- anode-shield wire間でガス増幅が起こりS2が発生

↓ E_{thre} を下げられない原因

Xe VUVによる光電効果

- Xeの発光(S1,S2) ~ 7eV
> 検出器部材の仕事関数

- Xe中の不純物(O_2, \dots)

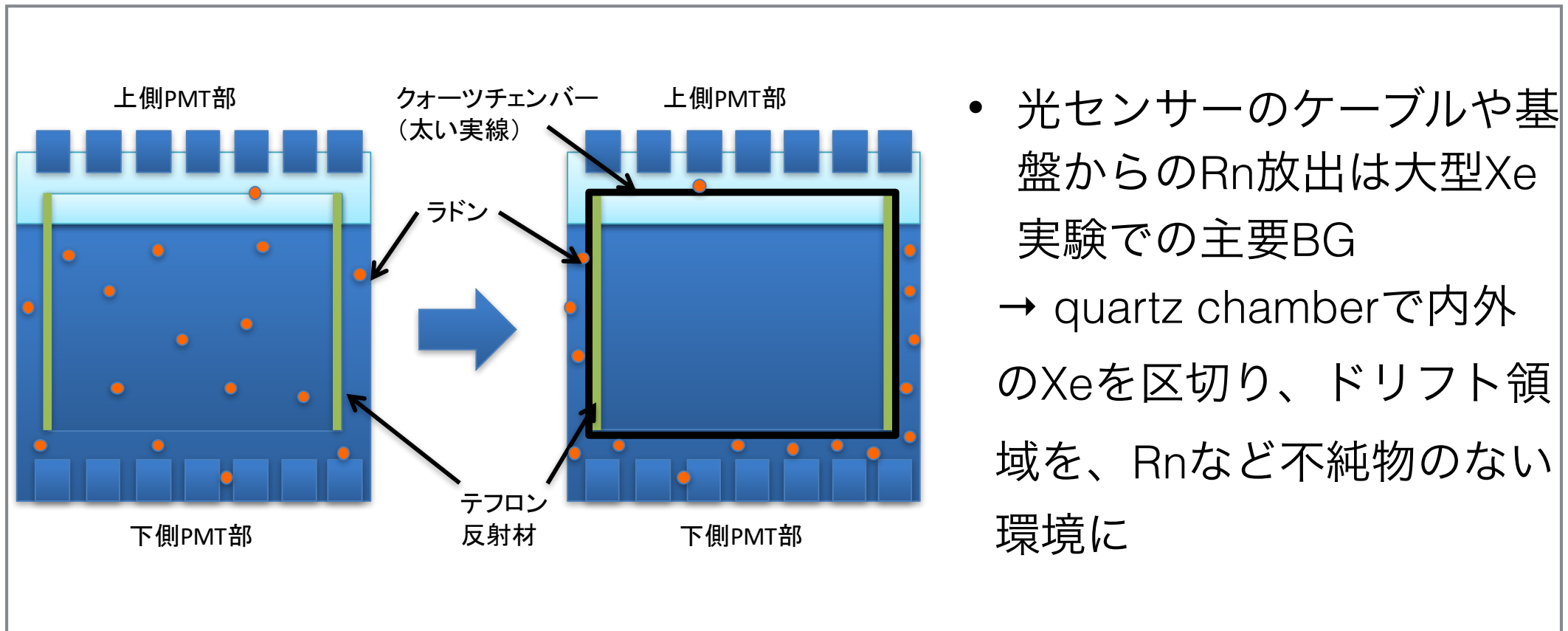
放射線BGより2桁高い!

-> 対策を施した、**S2 Only**に特化した検出器を作れないか？

Quartz Chamberの発想 - XMASS Rn除去R&D

XMASSでは将来計画に向け、多角度からの議論, R&Dが進行中

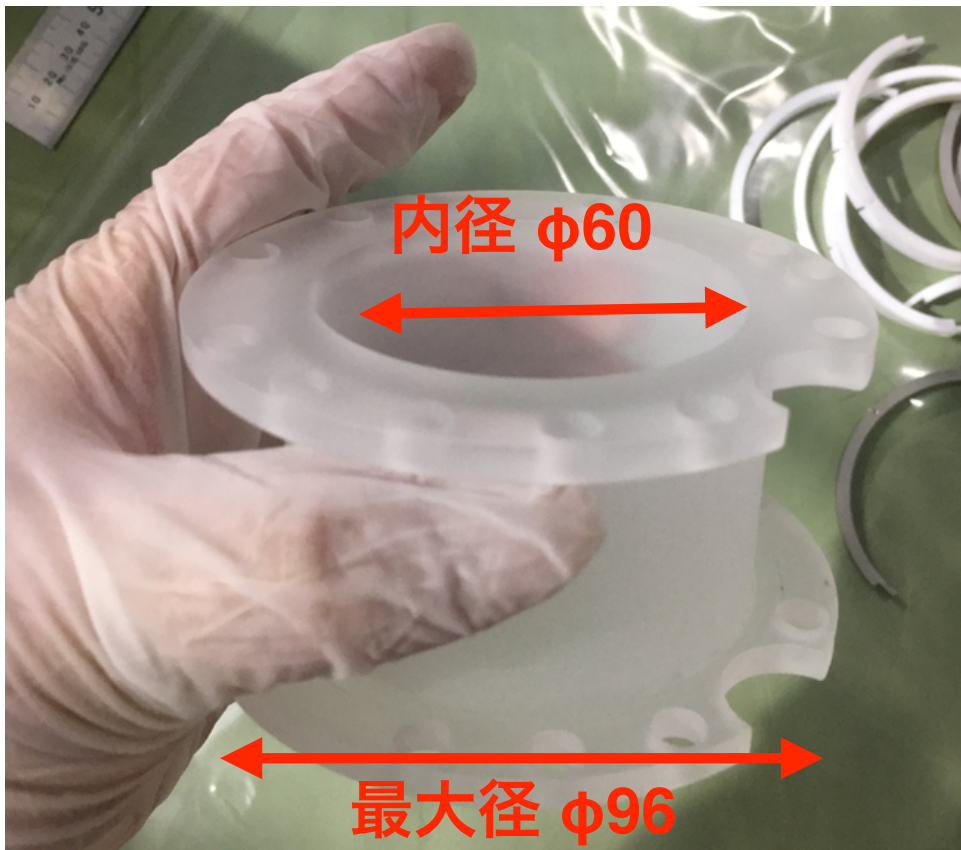
- **”Quartzで作った容器”**をXe中に入れた2相式が提案されている



quartz chamber

Rn除去 XMASS R&D用に小型quartz chamberの作成、電極のデザインなどが進んでいる

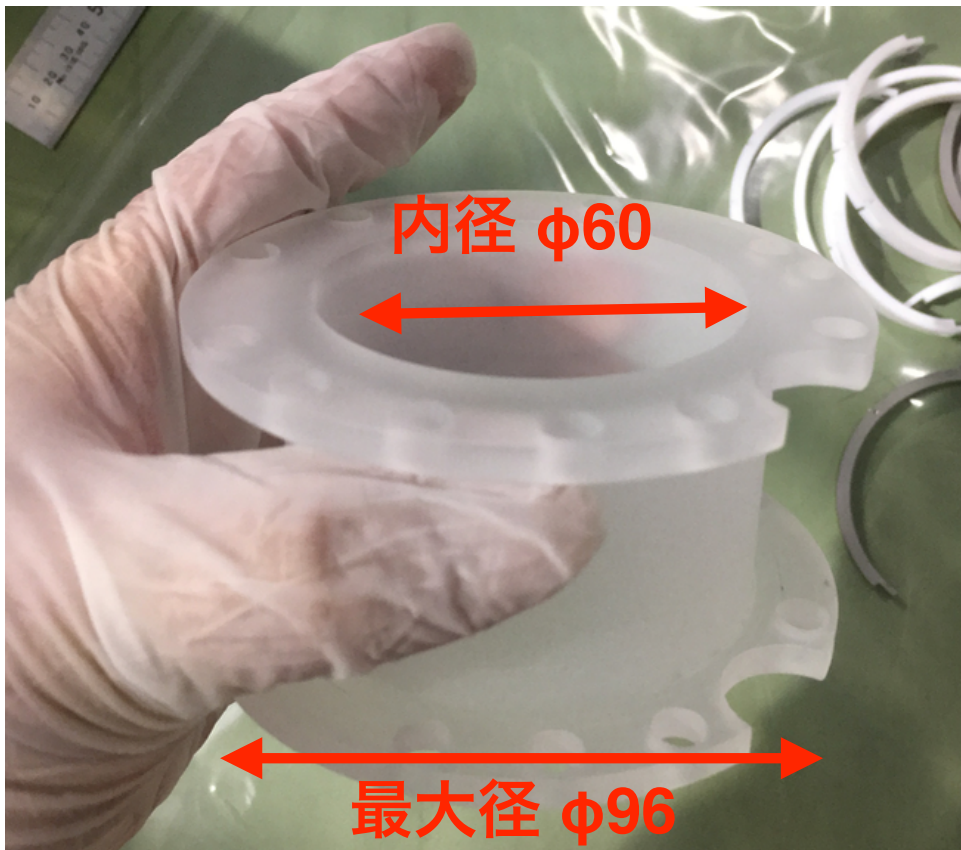
- 合成石英 (ESグレード)



quartz chamber

Rn除去 XMASS R&D用に小型quartz chamberの作成、電極のデザインなどが進んでいる

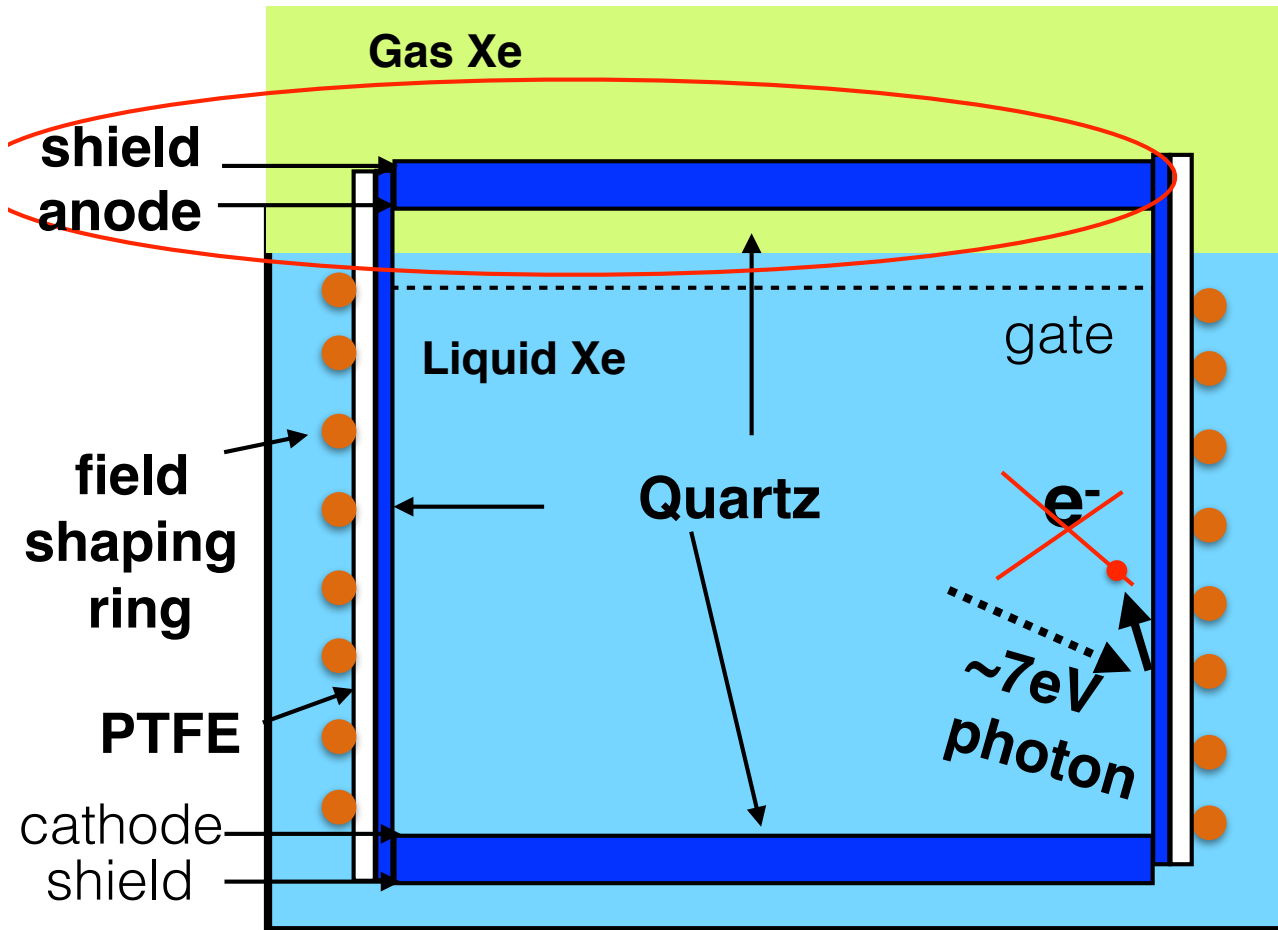
- 合成石英 (ESグレード)



→ この”**quartz chamber**”を
S2 Onlyに特化した検出器
に発展させる

新型検出器開発研究 *supported by* 新学術

quartzでドリフト領域を囲むと...



ガス層での事象を抑制

- anode-shield間を quartzで埋める

->余計なガス増幅が起こらない

VUVの光電効果を削減

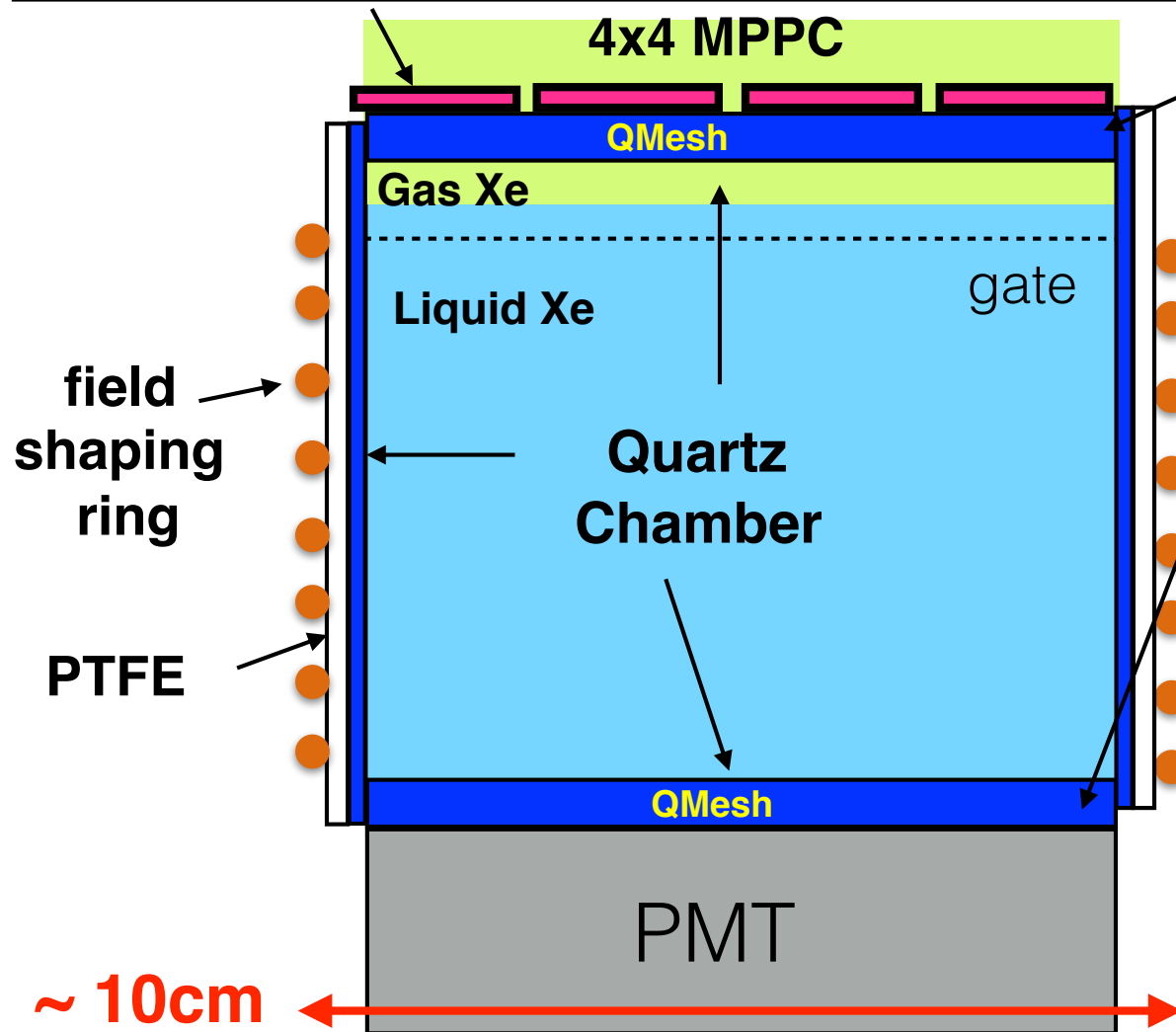
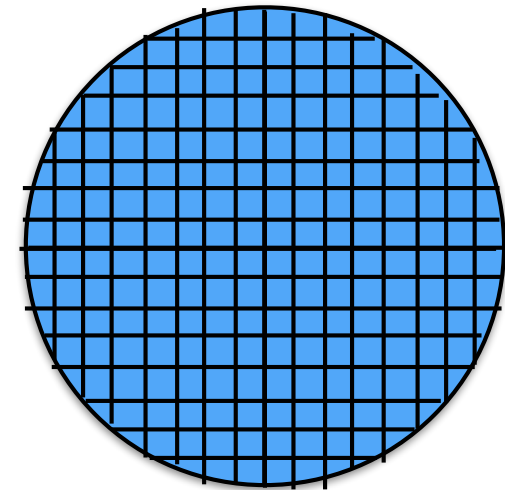
- quartzの仕事関数:8eV
- > 7eVのXe蛍光では光電効果は起こらない

- 通常内側に配置される PTFEをquartzの外へ

- **S2 only**に特化なら 反射材はいらない

-> 小型試験装置による実証試験

新型検出器開発研究 *supported by* 新学術

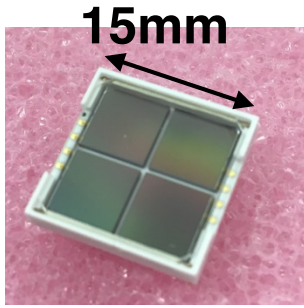


QMesh

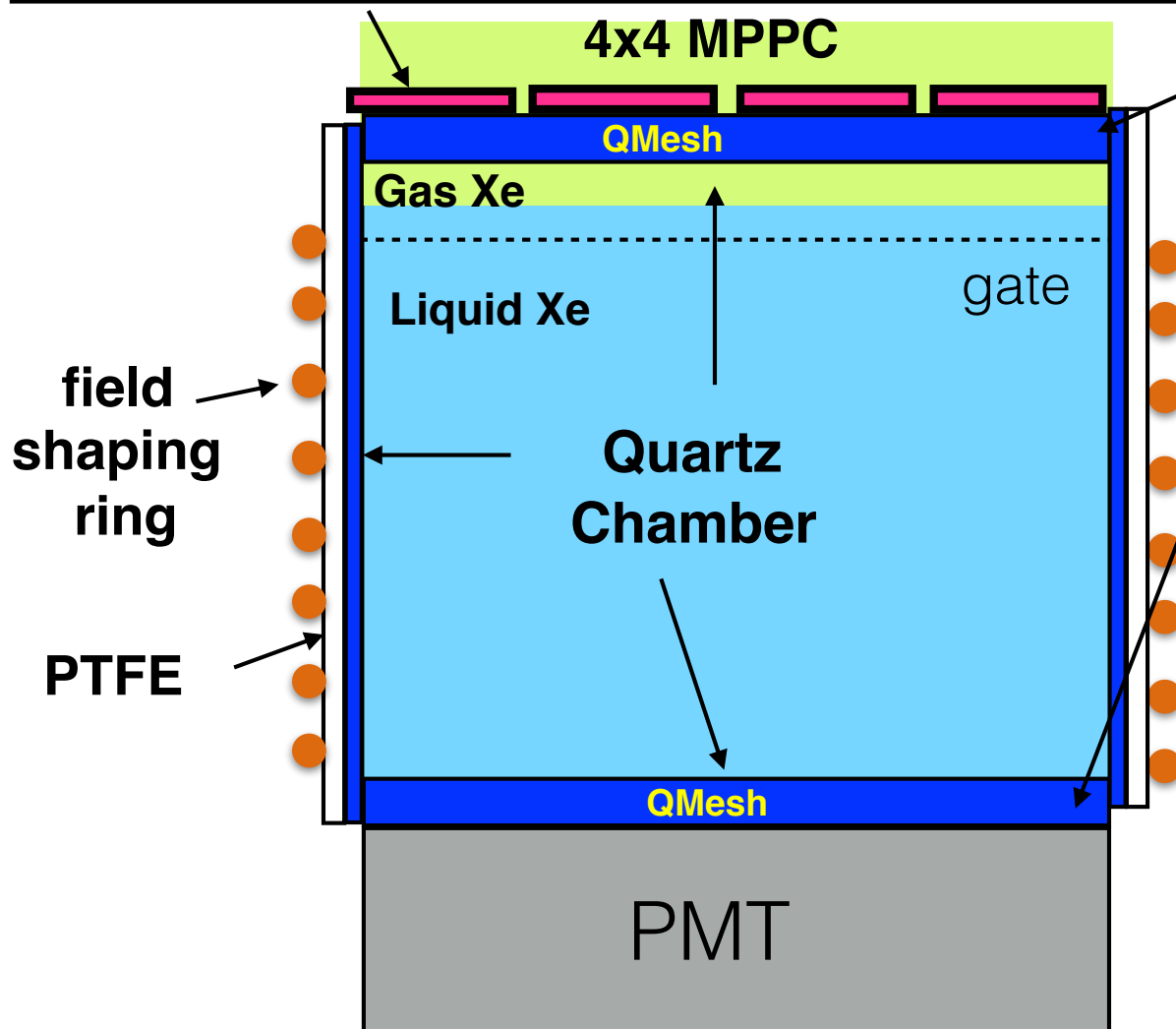
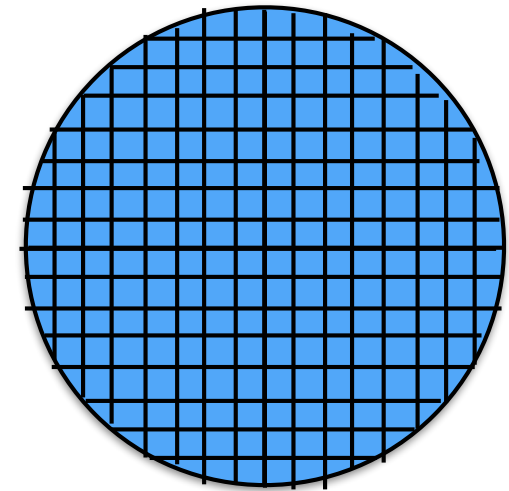
- 石英板両面にメッシュ状のNi-Al 電極を蒸着
- Anode, Cathode, & Shield gridの役割
- wireのたわみ、切断がない

新型検出器開発研究 *supported by* 新学術

MEG MPPC



- 小型試験装置でもXY位置を再構成可能
- 低物質質量 → **将来の低RI化**の可能性



QMesh

- 石英板両面にメッシュ状のNi-Al 電極を蒸着
- Anode, Cathode, & Shield gridの役割
- wireのたわみ、切断がない

→ **将来の大型化**

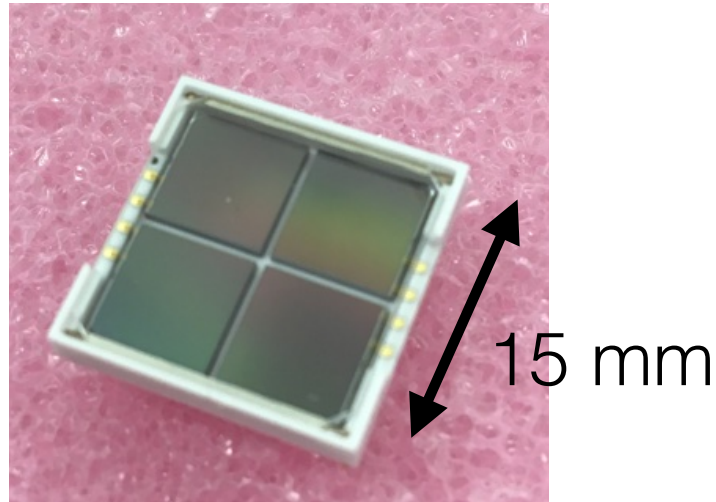
MPPC

MEG実験Xeカロリメータ

で使用実績・経験のあるMPPC

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

VUV-MPPC特性比較



■VUV-MPPC characteristics

Type No.	S10943-3186	S10943-4372	S13371-6050CQ-02
Generation	VUV2	VUV3	VUV4
Vop (typ.)	66 V	57 V	57 V
Gain	2.0×10^6	2.0×10^6	2.55×10^6
PDE ($\lambda=175\text{nm}$, vacuum)	10%	10%	24%
Cross-talk probability	45%	3%	3%

- * Vop : Recommended operating voltage
- * PDE : Photon detection efficiency
(not including afterpulse & cross-talk)
- * measurement condition: $V = V_{op}$

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved.

- 地下極低バックグラウンド実験での実用はされていないが、
- photon counting -> 低エネルギー事象に適している
- dark rateが多い -> **1e⁻ = 20P.E.**のS2 only解析では問題なし
- 低物質質量 -> **将来の低RI化**が可能か
- XMASSのscreening技術、低RI材料データを活用

将来の展望

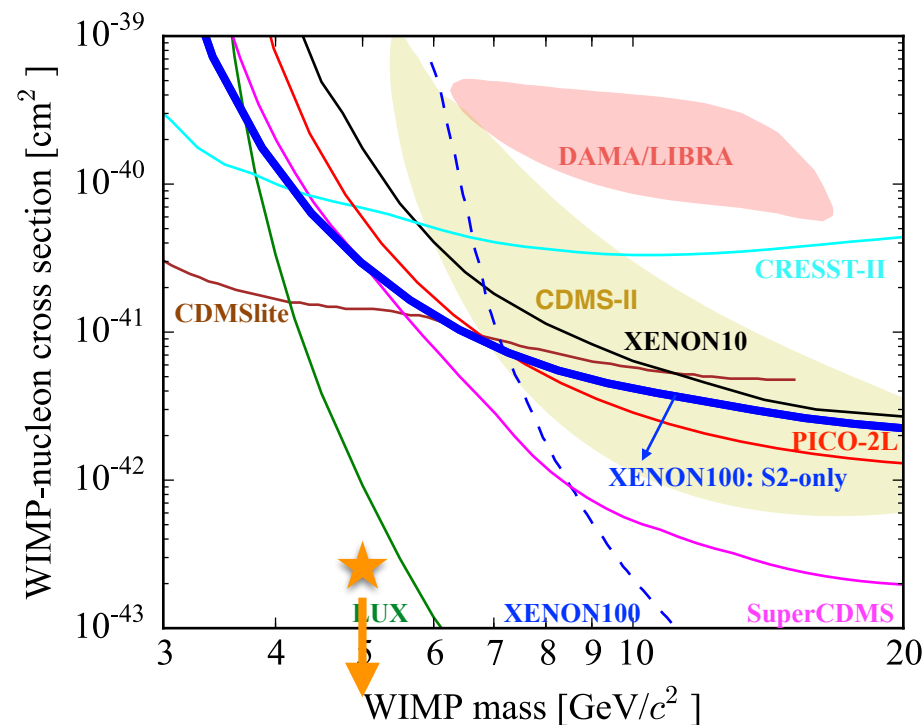
今回の公募研究を基に、S2 only解析に特化した検出器を作成

大型化

- 比較的軽め (Xe ~100kgサイズ)
 - 検出器サイズより**低閾値**が重要
- **QMesh**によりwireのたわみがない
 - 一様な電場の形成

低放射能化

- **XMASSの極低BG技術・装置**
 - 蒸留によるKr除去
 - QuartzによるRn除去R&D

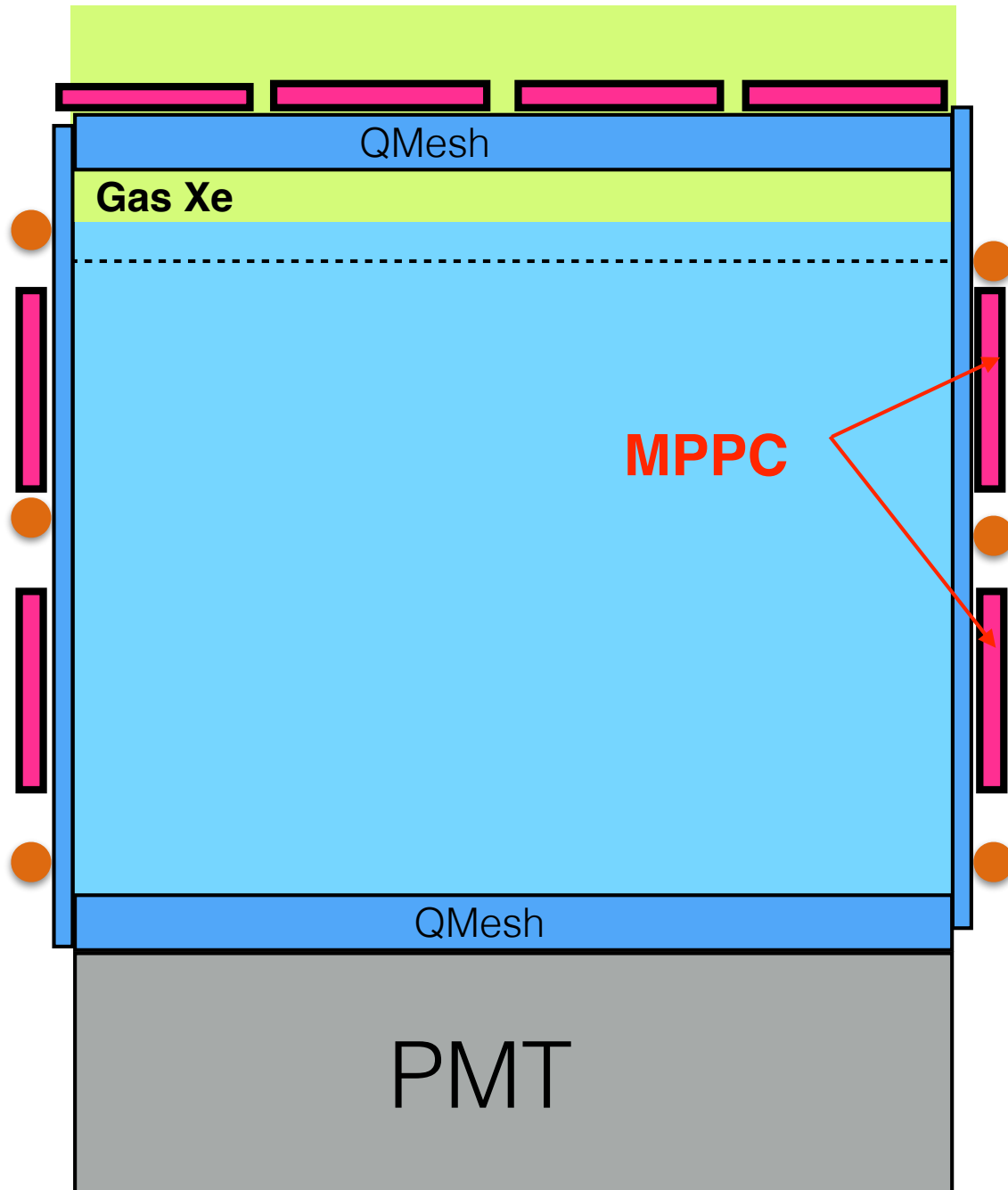


主要BGをXENON100レベルの放射線BGにできれば...

→ **2桁以上の感度改善**

($\sigma < O(10^{-43}) \text{ cm}^2 @ 5\text{GeV}$)

展望2: S1にも感度を持つ検出器



- 一般的な2相式
- 側面に反射材(PTFE)
 - S1を光センサーまで届かせるため
- 今回のセットアップではS1への感度は落ちる

- 側面にMPPCを配置し、S1の検出能力向上
- **高質量、低質量、双方のDM**に感度を持つ検出器

まとめ

- 低い質量($10^{-1} \sim 10$ GeV)の暗黒物質に注目
 - **低いE threshold**での測定が必要
- Xe2相型検出器での**S2 only**解析
 - 1電離電子 \sim 20 P.E $\rightarrow E_{\text{thre}} < 0.7$ keVnrが可能
 - 先行実験では放射線BG以外のBGにより感度が制限
- 一方“**Quartz Chamber**”によるXMASS Rn除去用R&Dが提案
 - ☞ **quartz chamber**のS2 only BGへの有用性を実証試験
 - + **MPPC**、**QMesh** のR&D
- 開発した検出器を基に、将来の高感度測定へ
 - XMASSの低RI装置・技術を組み合わせる
 - Xe \sim 100kgサイズで **$\sigma < O(10^{-43}) \text{ cm}^2 @ M_{\text{DM}} = 5 \text{ GeV}$**